



AGRICULTURES
ET DÉFIS DU MONDE
Collection Cirad-AFD

La transition agro-écologique des agricultures du Sud

F.-X. Côte, E. Poirier-Magona,
S. Perret, P. Roudier,
B. Rapidel, M.-C. Thirion,
éditeurs



éditions
Quæ

Agro-écologie et changement climatique : des liens intimes et porteurs d'espoir

*Emmanuel Torquebiau, Philippe Roudier, Julien Demenois,
Stéphane Saj, Étienne Hainzelin, Florent Maraux*

L'agriculture est sans doute l'une des activités humaines les plus dépendantes du climat. Tout agriculteur se doit de surveiller le ciel et tenir compte des conditions météorologiques (pluviométrie, température, vent, etc.). Dans sa version industrielle devenue la quasi-règle dans les pays développés, l'agriculture a cependant tenté de s'affranchir de cette dépendance. Au lieu de s'adapter aux contraintes environnementales et climatiques et à leur variabilité, cette agriculture d'économies d'échelle cherche souvent à modifier l'environnement, par exemple en irriguant, en uniformisant la topographie, en augmentant la taille des parcelles et réduisant l'hétérogénéité paysagère, en faisant en sorte que des variétés à haut rendement sélectionnées pour un environnement standard trouvent à tout prix des conditions optimales de croissance. Face à cette démarche faisant l'hypothèse qu'il est toujours possible de contrôler les conditions de croissance des cultures, le changement climatique est apparu ces dernières années comme un facteur nouveau.

Les relations entre agriculture et changement climatique

Les exemples d'impact du changement climatique sur l'agriculture abondent : saisonnalité irrégulière, précipitations décalées dans le temps ou réparties différemment, événements extrêmes, températures modifiant les dates des récoltes, bioagresseurs plus actifs, etc. Les impacts sont variés et joueront aussi bien sur les rendements (Roudier *et al.*, 2011) que sur la qualité nutritive des produits de récolte. Myers *et al.* (2014) prévoient ainsi pour le blé et le riz une baisse significative de la teneur en protéines, en zinc et en fer, due à une augmentation de la concentration en carbone atmosphérique. Dans les pays du Sud, l'impact du changement climatique sur le secteur agricole est particulièrement important, en raison de la forte

dépendance de l'agriculture de ces pays à l'environnement (par exemple, l'immense majorité des surfaces agricoles africaines sont non irriguées), ce qui la rend plus vulnérable, et parce que les conditions économiques ne permettent pas de mettre en place des schémas d'agriculture intensive. Dans leurs contributions déterminées au niveau national (NDC, *Nationally Determined Contributions*) et présentées par l'ensemble des pays de la planète lors de l'accord de Paris en 2015 (COP 21), tous les pays d'Afrique subsaharienne citent le secteur agricole parmi les options retenues pour l'adaptation au changement climatique.

Le secteur agricole ne fait pas que subir les impacts du changement climatique. Il est également un émetteur massif, responsable d'environ 12 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, et de 24 % si l'on inclut les émissions liées aux changements d'utilisation des terres, c'est-à-dire essentiellement la déforestation tropicale (IPCC, 2014). Mais on s'efforce désormais de comprendre comment l'agriculture (et l'utilisation des terres au sens large, y compris la foresterie) peut être l'une des solutions au changement climatique grâce au potentiel de séquestration du carbone dans les sols et la végétation et grâce à la diminution possible des émissions agricoles par la modification d'un certain nombre de pratiques comme l'usage massif d'engrais de synthèse. Il convient néanmoins de distinguer l'augmentation du stock de carbone organique dans le sol de sa séquestration, cette dernière correspondant uniquement à un retrait de gaz carbonique de l'atmosphère (Chenu *et al.*, 2018). Le concept d'agriculture « climato-intelligente » (*climate-smart agriculture*) tente de prendre en compte le fait que l'agriculture peut être un facteur aggravant du changement climatique, mais qui parallèlement en subit fortement les conséquences, en posant pour conditions de répondre simultanément à trois enjeux :

- être adaptée au changement climatique (fonction parfois assimilée, par abus de langage, à la résilience alors que celle-ci est un concept plus large qui inclut aussi la réduction du risque) ;
- l'atténuer ;
- assurer la sécurité alimentaire selon les principes de la durabilité.

Des analyses récentes ont montré la complémentarité qui existe entre l'agro-écologie et l'agriculture climato-intelligente, et notamment que celle-ci aurait tout à gagner à intégrer les concepts de l'agro-écologie (Saj *et al.*, 2017).

L'agro-écologie, une solution intégrée associant l'adaptation au changement climatique et son atténuation

Les principes de l'agro-écologie

L'agro-écologie dans sa dimension biophysique s'appuie sur des principes de diversité, d'utilisation efficiente des ressources naturelles, de recyclage des nutriments, de régulation naturelle et de synergie entre les composantes d'agroécosystèmes qui sont le plus souvent plurispécifiques. Ces principes permettent de contribuer à la mise en œuvre de pratiques agricoles adaptées au changement climatique et ayant une bonne résilience. Parmi les multiples définitions du concept de résilience, on l'appréhende ici comme la capacité d'un système à faire face à une série de chocs et de stress, dans un contexte dynamique et incertain.

La résilience est caractérisée par trois capacités de ce système :

- absorption et récupération ;
- préparation ;
- transformation.

La diversité des pratiques de l'agro-écologie permet de renforcer chacune de ces trois capacités et ainsi d'améliorer la résilience aux futurs changements climatiques. Par exemple, les techniques de conservation de l'eau permettent aux cultures de mieux faire face à un déficit pluviométrique imprévu (absorption) ; la diversité variétale à disposition de l'agriculteur lui permet de choisir avant la saison culturale quelles seront les variétés optimales à planter (en anticipant les variations à moyen terme) ; la diversité des variétés et des cultures et leur couplage avec l'élevage donnent à un agrosystème une capacité de transformation qui lui permet de survivre aux grands changements de long terme tels que ceux modélisés par les scénarios du changement climatique. La figure 13.1 illustre comment les variétés traditionnelles de mil et de sorgho seraient moins impactées par un scénario d'augmentation de la température de + 4 °C que certaines variétés améliorées (Roudier, 2012). L'agro-écologie est une option crédible pour améliorer l'adaptation et la résilience de l'agriculture face au changement climatique par les caractéristiques qu'elle intègre : la diversification des cultures et des parcelles, l'hétérogénéité

paysagère, l'utilisation de la biodiversité et de l'agrobiodiversité (la diversité des plantes et animaux utiles), la diminution des intrants émetteurs de gaz à effet de serre, la lutte biologique contre les ravageurs, les symbioses et interactions diverses (rhizobiums, mycorhizes, *push-pull*[47]), etc.

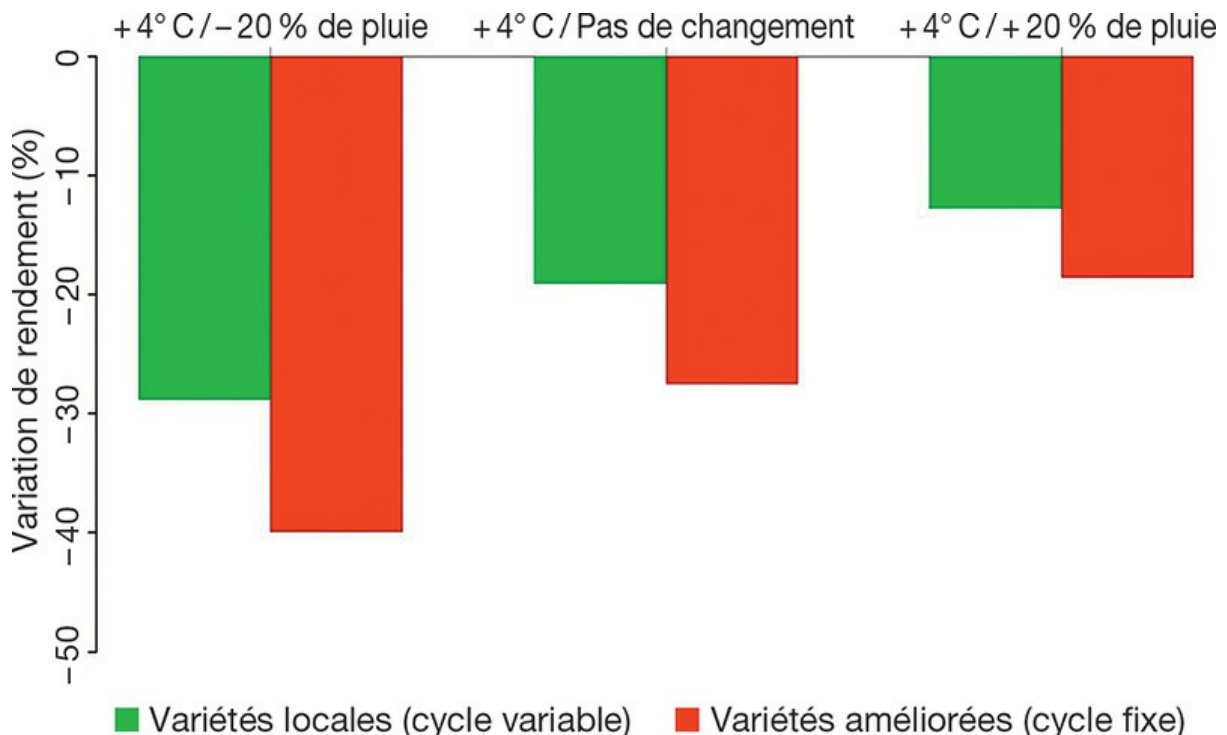


Figure 13.1. Variations moyennes de rendement du mil et du sorgho en Afrique de l'Ouest (35 stations) pour les variétés locales et les variétés améliorées sous trois scénarios de changement climatique futur (variations par rapport à la période 1961-1990). Ces résultats sont des modélisations issues du modèle Sarra-H (pour la méthodologie, voir Roudier, 2012).

Le risque climatique

Le risque climatique résulte d'une combinaison entre aléa et vulnérabilité (Gilard, 2015). La vulnérabilité aux changements climatiques est fonction de l'exposition à des aléas dont la probabilité peut varier, ainsi que de la sensibilité et de la capacité d'adaptation des sociétés concernées. Si l'adaptation peut réduire la sensibilité aux changements climatiques, c'est l'atténuation qui peut réduire l'aléa, c'est-à-dire l'exposition à ces changements, à ceci près que l'adaptation se joue localement, tandis que l'atténuation ne joue qu'à l'échelle globale, ses effets agissant dans l'atmosphère partagée par tous. Grâce à ses propriétés avérées en termes

d'amélioration de l'adaptation, l'agro-écologie peut donc avoir un effet modérateur du risque climatique et de la vulnérabilité. Réduire la vulnérabilité par des innovations agro-écologiques individuelles ou collectives se révélera souvent plus efficace et sans doute moins coûteux que de réduire l'aléa par des interventions techniques lourdes. Face à une vulnérabilité pluviométrique annoncée, la diversification spatiale et temporelle de cultures raisonnée à l'échelle du paysage peut par exemple être plus opérante que la construction de grandes structures d'irrigation.

L'atténuation du changement climatique

L'atténuation du changement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre ou par la séquestration du carbone ne fait pas explicitement partie des objectifs initiaux de l'agro-écologie. Même si l'on peut faire l'hypothèse que dans bien des cas, l'agro-écologie permet une augmentation de la séquestration et une diminution des émissions du fait de la réduction de l'usage des intrants de synthèse, la comparaison quantitative précise entre l'agriculture conventionnelle et l'agro-écologie dans ce domaine reste encore à faire. Alors qu'il n'y a pas de prescriptions réglementaires ni de certification officielle pour l'agro-écologie, ses caractéristiques contribuent néanmoins à l'atténuation du changement climatique, par exemple en augmentant la biomasse totale des parcelles cultivées, en assurant une couverture du sol tout au long de l'année, en favorisant l'accumulation de matière organique (et donc de carbone) dans le sol. De nombreux cas présentant les potentiels simultanés de l'agro-écologie pour l'adaptation au changement climatique et son atténuation ont été décrits (par exemple, Altieri *et al.*, 2015, 2017 ; Paustian *et al.*, 1998), par exemple en agroforesterie (photo 13.1), dans les pratiques de cultures associées (photo 13.2) ou dans l'hétérogénéité à grande échelle entretenue dans les paysages multifonctionnels (photo 13.3). Ce constat a permis de dire que si l'agriculture climato-intelligente n'est pas nécessairement agro-écologique, l'agro-écologie, elle, est nécessairement climato-intelligente (Tittonell, 2015).



Photo 13.1. Agroforêt à cacaoyers et fruitiers, Ghana. © E. Torquebiau / Cirad.



Photo 13.2. Cultures associées (maïs et haricots), Kenya. © E. Torquebiau / Cirad.



Photo 13.3. Paysage multifonctionnel (*land sharing*) avec rizières, haies, fruitiers, habitations et agroforêt, Sumatra, Indonésie. © E. Torquebiau / Cirad.

La séquestration de carbone dans le sol est le processus qui contribue le plus à la fonction d'atténuation du changement climatique par l'agro-écologie. Cette fonction a été formalisée par une initiative récente connue sous le nom de « 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » (4p1000, 2018 ; Soussana *et al.*, 2018) dont le triple objectif est :

- atténuer le changement climatique ;
- adapter l'agriculture aux dérèglements climatiques ;
- faire progresser la sécurité alimentaire.

Les sols agricoles et forestiers contiennent deux à trois fois plus de carbone que l'atmosphère, notamment sous forme de matière organique. Ainsi, une augmentation du stock de carbone organique des horizons superficiels des sols à un taux annuel de 4 pour 1 000, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre issues de la déforestation et de la dégradation des forêts, permettrait de compenser les émissions annuelles anthropiques de gaz à effet de serre. Cet objectif est techniquement faisable (Soussana *et al.*, 2018) et sans regret à prévoir car l'augmentation de la teneur en carbone organique des sols permet aussi d'accroître la fertilité des sols, d'atténuer leur sensibilité à l'érosion et d'augmenter leur

capacité de rétention en eau. Des cas de séquestration du carbone en zone tropicale à des taux égaux ou supérieurs à 4 pour 1 000 par an ont été décrits par exemple en utilisant du compost ou en incorporant les résidus de culture dans le sol (Kenne *et al.*, 2016), en agroforesterie (D'Andouss Kissi *et al.*, 2013) ou en agriculture de conservation (Corbeels *et al.*, 2018).

Rétroactions agro-écologiques positives

La démarche la plus porteuse en ce qui concerne la réponse de l'agro-écologie aux enjeux du changement climatique consiste donc à rechercher les systèmes qui favorisent la simultanéité entre adaptation et atténuation. On parle parfois de co-bénéfices atténuation/adaptation, de synergie, ou mieux, de *feedback* (rétroaction) positif entre adaptation et atténuation. Un *feedback* positif de l'adaptation sur l'atténuation peut par exemple se produire lorsque des pratiques innovantes conçues pour améliorer la fertilité du sol conduisent à une augmentation de la matière organique du sol et donc à une diminution des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) en raison d'un usage réduit d'engrais de synthèse. Cet effet se confirme par exemple dans le cas de caféiers agroforestiers : même si l'on y trouve plus d'azote que dans une caféière de plein soleil (et donc potentiellement plus d'émissions de N₂O), le bilan carbone total est meilleur dans le cas de l'agroforesterie (Hergoualc'h *et al.*, 2012). De façon similaire, un *feedback* positif de l'atténuation sur l'adaptation peut se produire lorsqu'un objectif d'augmentation de la séquestration du carbone du sol se traduit par des avantages en termes de propriétés du sol et une meilleure résilience au stress, avec des conséquences positives sur la production agricole.

L'agroforesterie fournit de nombreux exemples de rétroactions agro-écologiques positives, tels que celui connu sous le nom de « reverdissement du Sahel » au Niger (photo 13.4). La pratique se base sur la régénération naturelle assistée des arbres des champs, méthode ancienne qui tendait à disparaître mais que des politiques publiques innovantes (le transfert de l'État aux agriculteurs des droits de propriété des arbres) ont permis de relancer (Sendzimir *et al.*, 2011). La densité des arbres a fortement augmenté, améliorant la fertilité du sol et le microclimat (adaptation), favorisant la biomasse aérienne et souterraine et donc le stockage du carbone (atténuation), l'ensemble ayant un impact positif sur les revenus des agriculteurs et la sécurité alimentaire. Autre exemple

agroforestier, l'ombrage des plants de cacaoyers ou de caféiers par des arbres, qui permet de pallier les pertes dues à une éventuelle augmentation de la température. L'agriculture du Sud fournit ainsi des exemples convaincants pouvant être étendus à toute la planète.



Photo 13.4. Association agroforestière de maïs et *Faidherbia albida*, Dolékaha, Côte d'Ivoire. © Dominique Louppe / Cirad.

De nombreuses autres options agro-écologiques peuvent favoriser la synergie adaptation-atténuation : agriculture de conservation, cultures associées, engrais organiques, gestion améliorée des pâturages, gestion de l'eau, non-labour, couverture permanente du sol, etc. Même l'élevage, souvent accusé d'émettre de grandes quantités de gaz à effet de serre, peut, selon les modalités d'utilisation des pâturages, contribuer à cet équilibre entre adaptation et atténuation. Au Sénégal, l'étude de l'élevage extensif à l'échelle territoriale, une pratique particulièrement adaptée aux conditions locales, montre que sur un pas de temps annuel, les émissions de gaz à effet de serre et la séquestration du carbone s'équilibrent (Vayssières *et al.*, 2017).

C'est en effet à une échelle dépassant la parcelle, voire l'exploitation, que de nombreuses approches peuvent se prévaloir de favoriser la synergie entre adaptation et atténuation. Dans les paysages multifonctionnels

(Torquebiau, 2015 ; Denier *et al.*, 2015), il est possible d'intégrer des objectifs de production agricole ou forestière et des objectifs de protection de la nature et de la biodiversité. Ce concept connu sous le nom de *land sharing* (partage de la terre ; Grau *et al.*, 2013) permet d'assigner des objectifs d'adaptation ou d'atténuation à des unités paysagères voisines, souvent en interaction. Il s'oppose au *land sparing* (épargne de la terre) où production et protection de la nature sont séparées. Le *land sparing* est corollaire de la révolution verte et de la fameuse « hypothèse de Borlaug » : maximiser la production dans les zones agricoles avec des variétés productives, l'irrigation et les apports d'intrants afin de protéger la nature ailleurs. L'expansion continue des terres agricoles aux dépens de la nature a montré que cette hypothèse n'est pas vérifiée. À l'opposé, le *land sharing* est essentiellement agro-écologique et permet de favoriser des paysages « climato-compatibles » (*climate-smart landscapes* ; Harvey *et al.*, 2014 ; Torquebiau, 2017).

Encadré 13.1. L'agrobiodiversité : un bien commun pour augmenter la résilience au changement climatique

E. Torquebiau, P. Roudier, J. Demenois, S. Saj, É. Hainzelin, F. Maraux

La biodiversité des écosystèmes cultivés (et utile à l'homme, y compris dans les milieux naturels) constitue ce que l'on appelle l'agrobiodiversité. C'est le fondement de notre agriculture mais nous l'avons un peu oublié et l'agriculture contemporaine repose sur un nombre trop limité d'espèces et de variétés au sein de ces espèces. C'est pourtant un levier essentiel de l'agro-écologie (Hainzelin, 2013) car c'est sur la base de cette diversité (génétique, spécifique, paysagère) qu'il est possible de concevoir de nouveaux systèmes agricoles plus résilients face aux aléas environnementaux et climatiques. C'est grâce à des démarches innovantes de sélection et à des pratiques agricoles diversifiées et reposant sur une large gamme d'espèces et d'interactions entre espèces qu'il sera possible de répondre au déplacement de zones climatiques et agro-écologiques, à l'apparition de nouveaux bioagresseurs, aux événements climatiques extrêmes de plus en plus nombreux. Ce sont des systèmes agricoles riches en biodiversité et en biomasse qui permettront de favoriser la contribution de l'agriculture et de la foresterie à l'atténuation du changement climatique par la séquestration du carbone. C'est une agriculture « pérenne » (Perfecto *et al.*, 2009) qu'il faut pour cela encourager, fondée sur l'utilisation de ligneux, de plantes de couverture, de racines et de tubercules ou de graminées pérennes. Ces pratiques, qui sont historiquement employées pour répondre aux aléas

climatiques existants (choix de la variété en fonction des prévisions par exemple), sont aujourd'hui mises à mal dans plusieurs régions par la baisse de la diversité des variétés disponibles aux agriculteurs (Maikhuri *et al.*, 1997) mais également par l'apparition de brevets pour les semences alors que celles-ci étaient au préalable gérées comme un bien public (Brush, 2005).

Perspectives et limites

Bien que l'agro-écologie soit un concept qui date déjà de plusieurs décennies (Wezel et Soldat, 2009), il n'est répandu que dans le cas de certaines agricultures traditionnelles et il n'est pas encore diffusé à grande échelle. On peut le regretter mais espérer aussi que les contraintes du changement climatique sont une forme d'opportunité (au bon sens du terme) pour accélérer cette diffusion. Il est vraisemblable qu'un manque de soutien de la part des institutions officielles d'enseignement et de recherche explique en partie ce retard. L'agro-écologie a été et reste souvent de nos jours absente de l'enseignement agricole. On doit sans doute incriminer aussi l'absence de référence à l'agro-écologie dans la majorité des politiques publiques. La prise en compte (tardive) de l'agriculture par les instances officielles de la convention-cadre des Nations unies sur les Changements climatiques (UNFCCC) depuis la COP 23 (novembre 2017) va-t-elle changer les orientations ? Sachant que l'agro-écologie fait aussi les grandes lignes de certaines politiques de développement depuis quelques temps (par exemple à la FAO lors du *Symposium Agroecology for Food Security and Nutrition* ; FAO, 2015 ; Symposium FAO, 2018), on peut conjecturer un renforcement réciproque des thématiques de l'agro-écologie et du changement climatique.

Reste à assurer un « passage à l'échelle » de ces liens potentiellement intimes entre agro-écologie et changement climatique. Des besoins importants de sensibilisation des agriculteurs des pays du Nord comme du Sud au fait que l'agro-écologie peut être une réponse aux contraintes du changement climatique sont nécessaires. Mais comment aller au-delà des expériences réussies ici ou là et faire passer ce message scientifique au plus grand nombre lorsque les politiques publiques nationales ignorent l'agro-écologie, voire la contredisent à coups de subventions ou d'incitations diverses à l'agriculture industrielle ? Comment sensibiliser à ces techniques innovantes lorsque les personnels des services d'appui technique aux agriculteurs sont eux-mêmes formés à l'agriculture

conventionnelle ? Si l'on peut désormais, notamment grâce aux travaux récents sur le carbone du sol (Soussana *et al.*, 2018), envisager de faire jouer à l'agriculture un rôle contributif de solution au changement climatique, il est probable que les changements qui n'incluent pas une meilleure prise en compte des principes de l'agro-écologie ne permettront pas à l'agriculture de jouer ce rôle.

Il ne faut pas ignorer non plus que l'agro-écologie va contre les intérêts d'acteurs puissants (par exemple des fournisseurs d'intrants) et que donc la mobilisation d'une volonté politique n'est pas acquise d'avance. La transition vers l'agro-écologie, même si elle peut concerner tous les types de structures agricoles, est particulièrement bien adaptée aux petites exploitations. En effet, reposant sur la diversification des productions et sur des régulations biologiques issues de l'écosystème, les systèmes de cultures agro-écologiques sont par construction peu exigeants en capital, et présentent une durabilité agro-environnementale et socio-économique forte. De telles analyses permettent de nourrir de futurs plaidoyers essentiels à la formulation de politiques publiques, au Nord comme au Sud. Enfin, l'agro-écologie est fondamentalement liée au contexte local et son application à grande échelle dépend de la vivacité des systèmes locaux d'innovation, non seulement au niveau des pratiques agricoles mais aussi des chaînes de valeur (filières) et des nouveaux liens entre les zones urbaines et rurales. Cela pose un énorme défi de formation et de compétences et redessine le rôle que doit jouer la recherche.

Grâce à sa double action sur le climat, l'agro-écologie peut enfin aider à mettre en place les contributions déterminées au niveau national (NDC, *Nationally Determined Contributions*) présentées par l'ensemble des pays de la planète lors de l'accord de Paris en 2015 (COP 21) et qui doivent être revues à la hausse d'ici 2020. Globalement, 89 % des pays se réfèrent dans leur contribution au secteur agricole et à l'usage des sols au sens large (LULUCF, *Land Use, Land Use Change and Forestry*). Plus spécifiquement, 78 % des pays incluent l'agriculture dans leurs options d'atténuation et 100 % des pays d'Afrique subsaharienne la citent parmi les options d'adaptation (FAO, 2016). L'agro-écologie n'est malheureusement que rarement citée explicitement (Rwanda, Honduras) mais certaines de ses composantes le sont, par exemple : gestion conservatoire de l'eau, pastoralisme amélioré, pisciculture agro-écologique, approche paysage, corridors biologiques, pratiques agricoles à « bas carbone », etc. L'agro-écologie peut donc être une trajectoire à

suivre permettant de mettre en place des objectifs climatiques nationaux.

Références

4 per 1000, 2018. The 4 per 1000 Initiative. Soils for Food Security and Climate, <http://4p1000.org> ☐.

Altieri M.A., Nicholls C.I., 2017. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*, 140 (1), 33-45.

Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A., Lana M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35 (3), 869-890.

Brush S.B., 2005. Protecting traditional agricultural knowledge in wash, U.J.L., Pol'y 59, http://openscholarship.wustl.edu/law_journal_law_policy/vol17/iss1/5 ☐ (consulté le 17/09/2018).

Chenu C., Angers D.A., Barré P., Derrien D., Arrouays D., Balesdent J., 2018. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011> ☐.

Corbeels M., Naudin K., Guibert H., Torquebiau E., Cardinael R., 2018. The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil and Tillage Research*, <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.015> ☐.

D'Andous Kissi O., Guibert H., Palou Madi O., Ntoupka M., Deleporte P., Smektala G., Peltier R., 2013. Le bois, un atout pour la diffusion des plantations d'acacias gommiers au nord du Cameroun. *Revue forestière française*, 3, 241-253.

Denier L., Sherr S., Shames S., Chatterton P., Hovani L., Stam N., 2015. *Le Petit Livre des paysages durables*, Global Canopy Programme, Oxford, Royaume-Uni, 98 p.

FAO, 2015. *Proceedings of the International Symposium on Agroecology*


for Food Security and Nutrition, 18-19 septembre 2014, FAO, Rome, Italie, 426 p.

FAO, 2016. The Agriculture sectors in the intended nationally determined contributions: Summary, Environment and natural resources management working, paper # 61.

Gilard O., 2015. Aléa, vulnérabilité et risque. In : *Changement climatique et agricultures du monde* (E. Torquebiau, ed.), éditions Quæ, 27-36.

Grau R., Kuemmerle T., Macchi L., 2013. Beyond “land sparing versus land sharing”: Environmental heterogeneity, globalization and the balance between agricultural production and nature conservation. *Curr Opin Environ Sustain*, 5, 477-483.

Hainzelin E., ed., 2013. *Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture*, Cirad/Quæ, Versailles, 264 p.

Harvey C.A., Chacón M., Donatti C.I., Garen E., Hannah L., Andrade A., Bede L., Brown D., Calle A., Chara J., Clement Ch., Gray E., Minh H.H., Minang P., Rodriguez A.M., Seeberg-Elverfeldt Ch., Semroc B., Shames S., Smukler S., Somarriba E., Torquebiau E., Van Etten J., Wollenberg E., 2014. Climate-smart landscapes: Opportunities and challenges for integrating adaptation and mitigation in tropical agriculture. *Conservation Letters*, 7 (2), 77-90, <https://doi.org/10.1111/conl.12066> .

Hergoualc'h K., Blanchart E., Skiba U., Hénault C., Harmand J.M., 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems, Environment*, 148, 102-110.

IPCC, 2014. Summary for Policymakers. In : *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, contribution of Working Group III to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx, eds), Cambridge University Press, Cambridge / New York, Royaume-Uni / États-Unis, 33 p.

Kenne Kueteyim P., Guibert H., Kouassi Bredoumy S., 2016. Organic

amendments do not reverse the decay of stock of carbon of tropical soils after setting the crops: Experiments in Ivory Coast and Benin, Conference EcoSummit, 29 août - 1^{er} septembre 2016, Montpellier, France, Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, 1 p.

Maikhuri R.K., Semwal R.L., Rao K.S., Nautiyal S., Saxena K.G., 1997. Eroding traditional crop diversity imperils the sustainability of agricultural systems in Central Himalaya. *Current Science*, 73 (9), 777-782.


Myers S., Zanolatti A., Kloog I., Huybers P., Leakey A.D.B., Bloom A.J., Carlisle E., Dietterich L.H., Fitzgerald G., Hasegawa T., Holbrook N.M., Nelson R.L., Ottman M.J., Raboy V., Sakai H., Sartor K.A., Schwartz J., Seneweera S., Tausz M., Usui Y., 2014. Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510, 139-142


Paustian K., Cole C.V., Sauerbeck D., Sampson N., 1998. CO₂ mitigation by agriculture: An overview. *Climatic Change*, 40 (1), 135-162.

Perfecto I., Vandermeer J.H., Wright A.L., 2009. *Nature's Matrix: Linking agriculture, conservation and food sovereignty*, Earthscan, Londres, Royaume-Uni, 242 p.


Roudier P., 2012. Climat et agriculture en Afrique de l'Ouest : Quantification de l'impact du changement climatique sur les rendements et évaluation de l'utilité des prévisions saisonnières, PhD Thesis, EHESS, Paris, 189 p.


Roudier P., Sultan B., Quirion P., Berg A., 2011. The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environ Change*, 21, 1073-1083.

Saj S., Torquebiau E., Hainzelin E., Pagès J., Maraux F., 2017. The way forward: An agroecological perspective for Climate-Smart Agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 250, 20-24, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.003> .

Sendzimir J., Reij C.P., Magnuszewski P., 2011. Rebuilding resilience in the Sahel: Regreening in the Maradi and Zinder regions of Niger. *Ecol Soc*, 16 (3), 1, <http://dx.doi.org/10.5751/ES-04198-160301> .

Soussana J.F., Lutfalla S., Ehrhardt F., Rosenstock T., Lamanna Ch.,

Havlík P., Richards M., Wollenberg E., Chotte J.L., Torquebiau E., Ciaia Ph., Smith P., Lal R., 2018. Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. *Soil & Tillage Research*, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002> .

Tittonell P., 2015. Agroecology is climate-smart... (but the opposite is not necessarily true), extrait de la *Global Science Conference on Climate-Smart Agriculture*, Montpellier, mars 2015, <http://csa2015.cirad.fr/presentations>  (consulté le 17/09/2018).

Torquebiau E., 2015. Whither landscapes? Compiling requirements of the landscape approach. In: *Climate-smart landscapes: Multifunctionality in practice* (P. Minang *et al.*, eds), World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, Kenya, 21-36.

Torquebiau E., 2017. *Climate-smart agriculture* : Pour une agriculture climato-compatible. *Cahiers agricultures*, 26 (6), 66001.

Vayssières J., Assouma M.H., Lecomte Ph., Hiernaux P., Bourgoin J., Jankowski F., Corniaux C., Vigne M., Torquebiau E., Ickowicz A., 2017. L'élevage au cœur de paysages « climato-intelligents » en Afrique de l'Ouest. In : *Des territoires vivants pour transformer le monde* (P. Caron, T. Wassenaar, G. Coppens d'Eeckenbrugge, V. Papazian, eds), éditions Quæ, 114-120.

Wezel A., Soldat V., 2009. A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7, 3-18.

CHAPITRE 14

L'écologisation de l'agriculture au prisme de l'innovation collaborative

*Aurélie Toillier, Prosper Kola, Syndhia Mathé, Sygnola Tsafack,
Der Dabire, Bernard Triomphe*